

# 能源植物杂交狼尾草对NaCl胁迫的响应及其耐盐阈值

王 殿 袁 芳 王宝山 陈 敏\*

山东师范大学生命科学学院, 山东省逆境植物重点实验室, 济南 250014

**摘 要** 以能源植物杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)为实验材料, 用沙培盆栽的方法, 分别用0、0.3%、0.5%、0.9%和1.2%的NaCl处理4周后, 测定植株鲜重、干重、含水量、株高、分蘖数和不同部位的离子含量, 以确定其耐盐阈值和耐盐方式。结果表明, 随着NaCl浓度的增加, 杂交狼尾草的鲜重、干重、株高和分蘖数都显著降低, 地上部分鲜重和干重分别在NaCl浓度为0.568%和0.570%时下降了50%, 1.2% NaCl处理的杂交狼尾草几乎全部死掉。表明杂交狼尾草的耐盐阈值为0.57%; 但植株含水量和功能叶的Na<sup>+</sup>含量变化不明显, 老叶Na<sup>+</sup>含量在NaCl浓度为0.9%时明显升高, 是对照的2倍; 随NaCl浓度的升高, 根中的Na<sup>+</sup>含量显著升高, 在NaCl浓度为0.9%时, 根中的Na<sup>+</sup>含量达到对照的3倍以上。Na<sup>+</sup>含量在功能叶, 老叶和根中含量依次升高; 随NaCl浓度的升高, 地上部分和根中的K<sup>+</sup>含量都无明显变化; 随NaCl浓度的升高, 根中的Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>明显增加, 而地上部分Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>只有当NaCl浓度为0.9%时明显增加。以上结果表明杂交狼尾草具有一定的耐盐性, 其耐盐方式为拒盐, 耐盐阈值为0.57% (约100 mmol·L<sup>-1</sup>)。

**关键词** 杂交狼尾草, NaCl胁迫, 耐盐阈值, 拒盐

## Response of plant biofuel hybrid *Pennisetum* to NaCl stress and its salinity threshold

WANG Dian, YUAN Fang, WANG Bao-Shan, and CHEN Min\*

Shandong Provincial Key Laboratory of Plant Stress Research, College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

### Abstract

**Aims** Our objectives were to examine the response of biofuel plant hybrid *Pennisetum* (*P. americanum* × *P. purpureum*) to NaCl stress and determine its salt tolerance mechanism and salinity threshold.

**Methods** We cultured plants of this hybrid in plastic pots filled with sand containing 0, 0.3%, 0.5%, 0.9%, and 1.2% NaCl. After four weeks, we measured the fresh weight, dry weight, water content, plant height, tillering number and ion contents of different parts of the plants.

**Important findings** NaCl treatment significantly reduced shoot fresh weight and dry weight by 50% at 0.568% and 0.570% NaCl, respectively. With increasing NaCl concentration, Na<sup>+</sup> content of functional leaves did not change significantly, whereas Na<sup>+</sup> content of old leaves and roots increased significantly. Especially when the concentration of NaCl was 0.9%, Na<sup>+</sup> content of old leaves and roots increased two and three fold more than that of the control, meaning that Na<sup>+</sup> content in functional leaves, old leaves and roots increased gradually. With increasing NaCl concentration, K<sup>+</sup> content in the shoots and roots was not affected, whereas Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> in the roots increased significantly, and Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> in the shoot increased significantly only at 0.9% NaCl. These results indicated that the salt-tolerant mechanism of hybrid *Pennisetum* is salt exclusion, and its salinity threshold is 0.57% (about 100 mmol·L<sup>-1</sup>).

**Key words** hybrid *Pennisetum*, NaCl stress, salinity threshold, salt exclusion

土壤盐渍化问题是困扰农业生产的一大难题。我国盐渍化土壤总面积约为1 × 10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>, 约占全国可耕地面积的25% (黄昌永, 2000)。我国在农业现代

化的进程中, 正面临着严峻的人口、资源和环境问题。为确保我国人口的食物安全, 在生物质能源产业中必须做到“不与人争粮、不与粮争地”, 应该充

分开发和利用盐碱地(邢廷铤, 1999)。黄河三角洲位于山东省北部, 现有 $5.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 盐碱地, 而且盐碱地面积仍在以每年 $1.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的速度增加, 这些土地都不适于普通农作物生长, 是国家的重要后备土地资源(董合忠, 2010)。

国外在20世纪80年代中期开始培育用于可再生能源的绿色植物, 目标主要集中在“能源草”的开发上。美国2008年10月发布的《国家生物燃料行动计划》中提到, 各国已从6 500种野生杂草里找到30多种“能源草”, 可以从中提取到石油的代用品。种植“能源草”以生产乙醇等生物质燃料在美国和欧盟国家备受重视。由于坚硬的纤维化草本植物比常规的淀粉作物有较高的乙醇产量和较好的能源平衡, “能源草”被认为是最具潜力的能源植物。杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)为禾本科狼尾草属多年生草本, 它是以象草为父本、美洲狼尾草为母本的杂交种(陈志彤等, 2006), 具有高产、优质、耐高温、夏季生长旺盛等特点(白淑娟等, 1994; 顾洪如等, 2002), 同时又具有较强的抗倒伏、抗病、抗旱和保水能力, 还具有一定的耐湿、耐水和耐盐能力(杨运生等, 1987), 是一种优质的能源植物, 近年来被广泛种植(杨运生等, 1984; 白淑娟等, 1994; 陈锦新等, 1998; 顾洪如等, 2002)。

杂交狼尾草的广泛种植不可避免地带来了“与粮争地”的问题, 因此, 如果能利用黄河三角洲现有的盐碱荒地种植杂交狼尾草就能很好地解决这一问题, 在获得较高经济效益的同时, 还会给当地带来良好的生态效益和社会效益——种植杂交狼尾草会大大降低土壤蒸发, 增加土壤有机质含量, 改善土壤颗粒结构和微生物群落, 降低土壤含盐量。杂交狼尾草作为一种能源植物受到广泛的关注, 但是以往的实验对其抗盐性的研究较少(Bidinger *et al.*, 2005), 其耐盐方式和耐盐阈值没有确定。为了研究杂交狼尾草的耐盐性, 本实验用不同浓度的NaCl处理杂交狼尾草幼苗, 并测定相关指标。这些结果为在盐碱地上种植杂交狼尾草以及将杂交狼尾草引种到黄河三角洲盐碱地上提供了理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

实验材料为杂交狼尾草, 由中国农业大学草业

研究中心张蕴薇教授提供。

### 1.2 实验材料的培养与处理

挑选大小一致的杂交狼尾草幼苗, 用流水洗净后, 移栽到装有干净细沙、外径27 cm、高27 cm的花盆中, 每盆盛有5 kg细沙, 每盆种1株杂交狼尾草。将移栽后的幼苗从距离沙子表面2 cm处剪掉地上部分, 促进其分蘖, 置于室外培养(培养条件: 平均光照强度为 $2\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 光照时间为12.5 h; 相对湿度为40%–75%; 昼夜温度22 °C/32 °C)。待幼苗长至10 cm高时, 取大小一致的幼苗平均分为5组, 分别用0、0.3%、0.5%、0.9%和1.2%的NaCl溶液(Hoagland营养液配制)浇灌处理, 每个处理设6个重复。

NaCl处理按每天0.25%浓度递增至目标浓度, 浇灌时为了保持盆内NaCl浓度恒定, 每天早晚各浇灌一次, 每次以从底部流出的溶液体积占浇灌总体积的一半为标准。NaCl处理4周后进行各指标的测定。

### 1.3 生理指标的测定

#### 1.3.1 植株干、鲜重和含水量的测定

小心将植株从沙子中取出, 迅速用自来水洗净根上的沙子, 去离子水洗净后迅速用吸水纸吸干, 去掉已经枯死的叶片, 分别称量地上部分和地下部分的鲜重。105 °C杀青15 min, 80 °C烘至恒重。

含水量计算方法: 含水量 = (鲜重 - 干重) / 鲜重 × 100%。

#### 1.3.2 株高和分蘖的测量

用米尺分别测量每株幼苗的高度, 并记录每株幼苗的分蘖数。

#### 1.3.3 不同部位离子含量的测定

从植株上部向下分别取第4片叶(为功能叶), 第7片叶(为老叶)和根的鲜材料, 叶片和根系均取中间部位。将材料剪碎后称取0.3 g放入试管中加10 mL去离子水, 沸水浴12 h, 定容至25 mL。用410型火焰光度计(Sherwood Scientific Ltd., Cambridge, UK)测量 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 的含量, 并计算 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 。

#### 1.3.4 耐盐阈值的确定

本实验分别对NaCl处理4周后的杂交狼尾草幼苗干、鲜重进行分析, 以不同NaCl浓度为自变量建立回归曲线, 耐盐阈值设定为鲜重、干重分别比对照下降50%时的NaCl浓度作为杂交狼尾草的耐盐阈值。

### 1.4 数据分析

采用SPSS 13.0软件进行方差分析及最小显著差异性检验, 以 $p < 0.05$ 为差异性显著。

## 2 结果

### 2.1 NaCl胁迫对杂交狼尾草幼苗干、鲜重和含水量的影响

植株的生长量是其耐盐能力的重要衡量指标。为了测定杂交狼尾草的耐盐能力, 我们对不同浓度NaCl处理的杂交狼尾草的生物量进行了测定。结果

如图1所示, 杂交狼尾草的地上部分和地下部分的鲜重、干重都随NaCl浓度的升高而显著降低。植株地上部分的含水量在不同NaCl浓度之间基本无差异, 地下部分差异也不显著。由于1.2% NaCl处理的杂交狼尾草80%已经死亡, 所以未列出此处理的结果。

### 2.2 NaCl胁迫对杂交狼尾草幼苗株高和分蘖数的影响

由图2可以看出, 随着NaCl浓度的升高, 杂交狼尾草的株高显著降低( $p < 0.05$ ), 分蘖数也呈下降

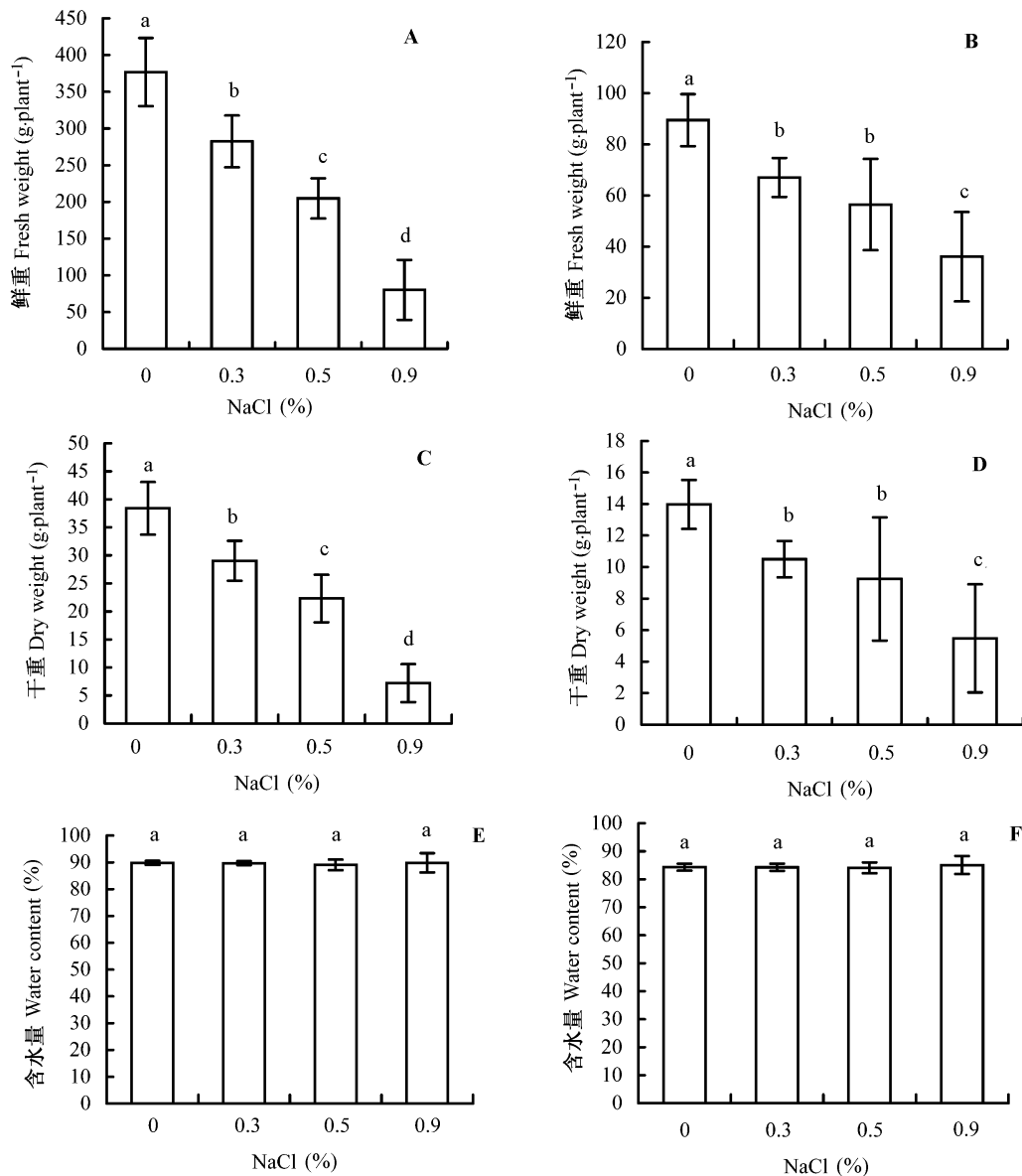


图1 NaCl胁迫对杂交狼尾草幼苗干重、鲜重和含水量的影响(A, C, E为地上部分; B, D, F为地下部分) (平均值±标准偏差,  $n = 6$ )。不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 1 Effect of NaCl stress on the fresh weight, dry weight and water content of shoots (A, C, E) and roots (B, D, F) of hybrid pennisetum seedling (mean ± SD,  $n = 6$ ). Different letters mean significantly different ( $p < 0.05$ ).

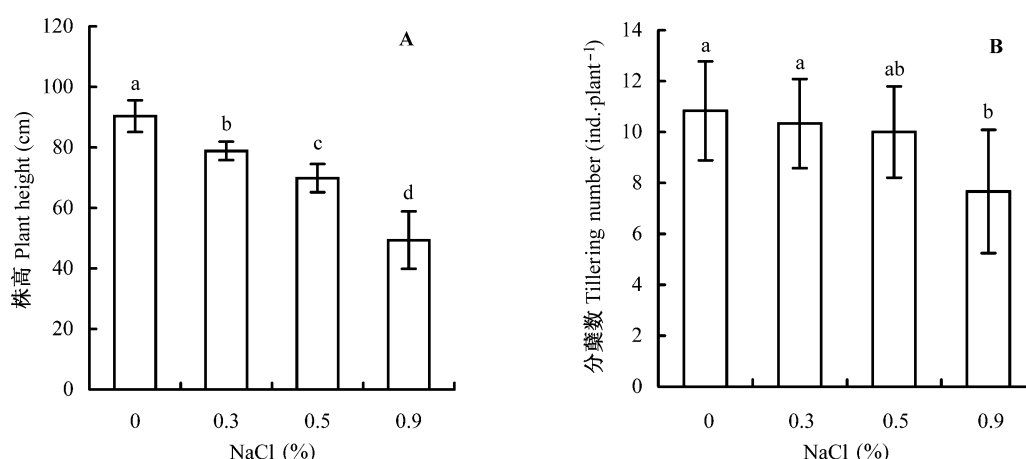


图2 NaCl胁迫对杂交狼尾草幼苗株高(A)和分蘖数(B)的影响(平均值±标准偏差,  $n = 6$ )。不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。  
**Fig. 2** Effect of NaCl stress on plant height (A) and tillering number (B) of hybrid *pennisetum* seedling (mean ± SD,  $n = 6$ ). Different letters mean significantly different ( $p < 0.05$ ).

趋势。当NaCl浓度为0.5%时, 其分蘖数和对照相比下降不显著, 而当NaCl浓度为0.9%时, 其分蘖数显著减少( $p < 0.05$ )。

### 2.3 NaCl胁迫对杂交狼尾草幼苗离子含量及分布的影响

为了进一步探讨杂交狼尾草的耐盐机理, 我们对不同浓度的NaCl处理4周的杂交狼尾草幼苗的根和地上部分的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 含量进行了测定。结果如图3所示, 随NaCl浓度的增大, 杂交狼尾草地上部分和根中 $\text{K}^+$ 含量都无明显变化。从图3B可以看出, NaCl处理明显增加了杂交狼尾草根部的 $\text{Na}^+$ 含量, 随NaCl浓度的增大, 根中的 $\text{Na}^+$ 含量呈显著增加的趋势, 当NaCl浓度为0.9%时, 根中的 $\text{Na}^+$ 含量约是对照的3倍。但地上部分却与根中明显不同, 功能叶的 $\text{Na}^+$ 含量差异不明显, 老叶中的 $\text{Na}^+$ 含量增加显著, 同时老叶中的 $\text{Na}^+$ 含量高于功能叶。图3B还表明, 当NaCl浓度为0.9%时,  $\text{Na}^+$ 含量在功能叶、老叶和根中含量依次升高。图3C表明了杂交狼尾草在不同浓度NaCl条件下的 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ , 随NaCl浓度的增加, 杂交狼尾草根中的 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 显著升高, 而地上部分的 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 只有当NaCl浓度为0.9%时明显增加。从上述结果可以看出, 杂交狼尾草是通过将过多的 $\text{Na}^+$ 积累在根中或老叶中, 以避免过多的 $\text{Na}^+$ 对功能叶和幼叶的伤害, 即杂交狼尾草是通过拒 $\text{Na}^+$ 方式减轻盐害的。

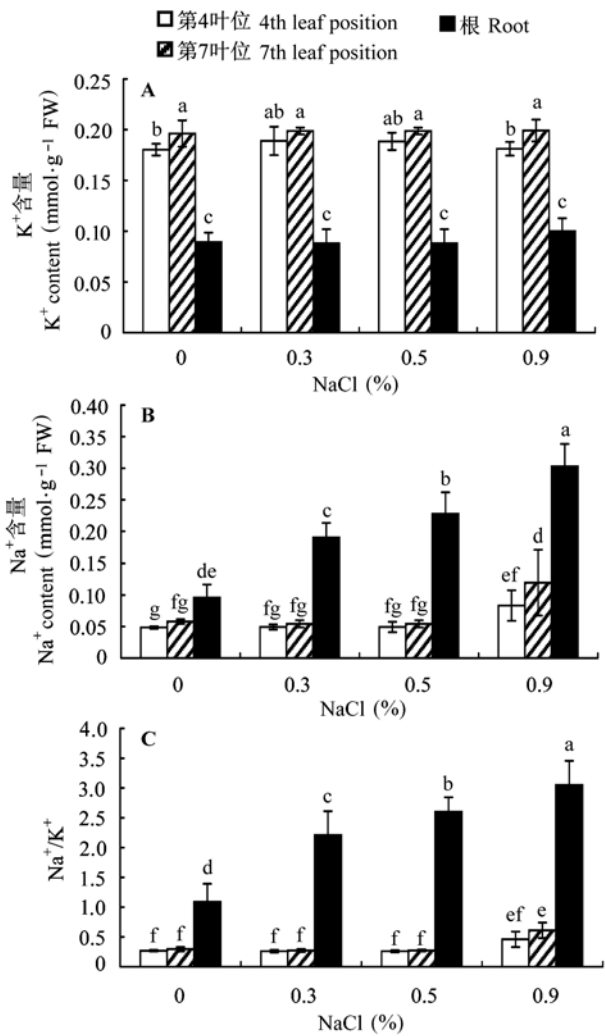
### 2.4 杂交狼尾草幼苗耐盐阈值的确定

植物的生长量是其耐盐能力的重要衡量指标, 多数研究均以植物生长量或生物量下降50%时的盐浓度作为其耐盐阈值, 我们以这种方法确定杂交狼尾草耐盐阈值, 即以杂交狼尾草的生物量下降50%为耐盐阈值。我们分别求得地上部分鲜重和干重下降50%时的NaCl浓度分别为0.568%和0.570% (图4), 因此杂交狼尾草的耐盐阈值为0.57% (约为 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

## 3 讨论

杂交狼尾草作为一种优质“能源草”受到广泛的关注, 但是其耐盐方式和耐盐阈值没有确定。本试验对杂交狼尾草的耐盐性进行了初步研究, 并确定了其耐盐阈值, 这为在盐碱地上种植和引种到黄河三角洲提供了理论依据。植物的生长量是其耐盐能力的重要衡量指标, 多数研究以植物生长量或生物量下降50%时的盐浓度作为其耐盐阈值(Qian *et al.*, 2001; Suplick-Ploense *et al.*, 2002; Alshammery *et al.*, 2004; 刘一明等, 2009), 我们以这种方法作为确定杂交狼尾草耐盐阈值的方法。最终确定其耐盐阈值是0.57% (约 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

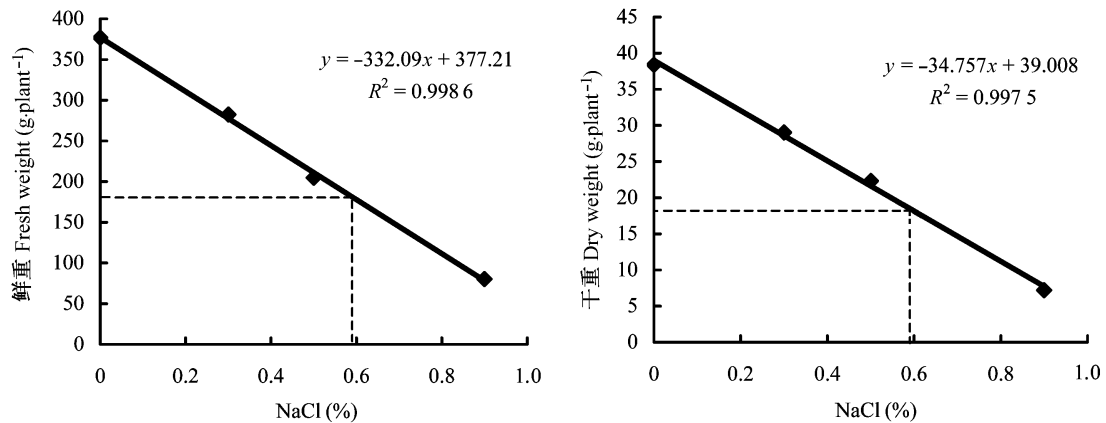
植物生长环境中的盐分超过其耐盐阈值时, 就会引起植物有机体在所有功能水平上产生变化和反应, 即发生胁迫(王宝山, 2010)。植物在盐胁迫下



**图3** NaCl胁迫对杂交狼尾草幼苗不同部位K<sup>+</sup>含量(A)、Na<sup>+</sup>含量(B)和Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>(C)的影响(平均值±标准偏差, n = 6)。不同字母表示差异显著(p < 0.05)。

**Fig. 3** Effect of NaCl stress on the content of K<sup>+</sup> (A), Na<sup>+</sup> (B) and Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> (C) of different parts of hybrid *pennisetum* seedling (mean ± SD, n = 6). Different letters mean significantly different (p < 0.05).

最明显的变化是生长受到抑制(王宝山等, 1997), NaCl胁迫下杂交狼尾草的地上部分和地下部分的干、鲜重都是显著下降, 地上部分的下降速率更快, 这与王宝山等(1997)的结果一致。但是植株未死亡部分的含水量却没有下降, 说明杂交狼尾草有专门的应对渗透胁迫的机制。株高和分蘖数在NaCl胁迫下也都下降。植物在NaCl胁迫下会受到渗透胁迫和离子胁迫, 植物应对离子胁迫主要有3种方式: 泌盐、拒盐和稀盐。本实验的结果表明, 随着NaCl浓度的增大, 杂交狼尾草根中的Na<sup>+</sup>含量呈显著增加的趋势, 地上部分却与根中明显不同, 功能叶的Na<sup>+</sup>含量差异不明显, 老叶中的Na<sup>+</sup>含量增加显著, 同时老叶中的Na<sup>+</sup>含量要高于功能叶。特别是当NaCl浓度为0.9%时, 从图3B可以看出根、老叶中的Na<sup>+</sup>含量分别是对照的3倍和2倍, 即当NaCl浓度为0.9%时, Na<sup>+</sup>含量在功能叶、老叶和根中含量依次升高。这些结果表明杂交狼尾草是通过拒盐方式来应对外界的NaCl胁迫, 即将Na<sup>+</sup>贮存于根部, 不让或只让少量的Na<sup>+</sup>进入地上部分; 将进入地上部分的Na<sup>+</sup>储存在老叶中, 从而保护了功能叶和幼叶。这与其他禾本科植物的抗盐方式基本相同(Yang *et al.*, 2002)。NaCl处理对杂交狼尾草幼苗的K<sup>+</sup>含量没有显著影响, 但是随着NaCl浓度的增加, 杂交狼尾草根中的Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>明显增加, 而只有当NaCl浓度为0.9%时, 地上部分的Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>才显著增加, 可见过多的Na<sup>+</sup>进入植株后增加了根和地上部分的Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>, 造成胞质中Na<sup>+</sup>过多, 胞质中过多的Na<sup>+</sup>破坏细胞内的离子稳态、引起生物膜功能紊乱、抑制许多胞质酶的活性和细胞代谢, 进而影响细胞分裂、生长、发



**图4** 杂交狼尾草幼苗的耐盐阈值确定。以生物量下降50%为标准确定其耐盐阈值。

**Fig. 4** Determination of the salinity threshold of hybrid *pennisetum* seedling. Salinity threshold was determined by the biomass decreased by 50%.

育和光合(Horie & Schroeder, 2004), 所以当NaCl浓度为0.9%时, 杂交狼尾草的生长受到严重抑制(图1)。

上述结果表明杂交狼尾草具有一定的耐盐能力, 能在含盐0.5%以下的盐碱地上生长, 其耐盐方式为拒盐, 耐盐阈值为0.57% (约100 mmol·L<sup>-1</sup>)。以上结果为将杂交狼尾草在盐碱地上种植以及引种到黄河三角洲提供了理论依据。我们的大田试验也表明杂交狼尾草在含盐0.5%以下的盐碱地中生长良好, 目前此试验正在进行中。

### 参考文献

- Alshammary SF, Qian YL, Wallner SJ (2004). Growth response of four turfgrass species to salinity. *Agricultural Water Management*, 66, 97–111.
- Bai SJ (白淑娟), Yang YS (杨运生), Gu HR (顾洪如), Zhou WX (周卫星) (1994). The utilization of *Pennisetum* hybrid in agricultural area of south Jiangsu. *Grassland of China* (中国草地), (4), 33–35. (in Chinese with English abstract)
- Bidinger FR, Serraj R, Rizvi SMH, Howarth C, Yadav RS, Hash CT (2005). Field evaluation of drought tolerance QTL effects on phenotype and adaptation in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] topcross hybrids. *Field Crops Research*, 94, 14–32.
- Chen JX (陈锦新), Zhang GP (张国平), Zhao GP (赵国平) (1998). Studies on growth and development traits of hybrid *Pennisetum*. *Pratacultural Science* (草业科学), 15(4), 14–17. (in Chinese with English abstract)
- Chen ZT (陈志彤), Ying CY (应朝阳), Lin YS (林永生), Huang YB (黄毅斌) (2006). The cultivation techniques and utilization value of hybrid *Pennisetum*. *Fujian Agricultural Science and Technology* (福建农业科技), (2), 44–45. (in Chinese with English abstract)
- Dong HZ (董合忠) (2010). *Cotton Farming in Saline Soil* (盐碱地棉花栽培学). Science Press, Beijing. 36. (in Chinese)
- Gu HR (顾洪如), Ding CL (丁成龙), Hu LG (胡来根) (2002). *The Production of High Quality Forage* (优质牧草生产大全). Phoenix Science Press, Nanjing. 146–152. (in Chinese)
- Horie T, Schroeder JI (2004). Sodium transporters in plants. Diverse genes and physiological functions. *Plant Physiology*, 136, 2457–2462.
- Huang CY (黄昌勇) (2000). *Soil Science* (土壤学) 2nd edn. China Agriculture Press, Beijing. 303. (in Chinese)
- Liu YM (刘一明), Chen FZ (程凤枝), Wang Q (王齐), Hu YY (胡玉咏), Wang ZL (王兆龙) (2009). Salinity stress responses and tolerance thresholds in four warm-season turfgrasses. *Acta Pratacultural Sinica* (草业学报), 18, 192–199. (in Chinese with English abstract)
- Qian YL, Wilhelm SJ, Marcum KB (2001). Comparative responses of two Kentucky bluegrass cultivars to salinity stress. *Crop Science*, 41, 1895–1900.
- Suplick-Ploense MR, Qian YL, Read JC (2002). Relative NaCl tolerance of Kentucky bluegrass, Texas bluegrass, and their hybrids. *Crop Science*, 42, 2025–2030.
- Wang BS (王宝山) (2010). *Plant Biology Under Stress* (逆境植物生物学). Higher Education Press, Beijing. 47. (in Chinese)
- Wang BS (王宝山), Zou Q (邹绮), Zhao KF (赵可夫) (1997). Response of different organ growth of sorghum to NaCl stress and the threshold salinity. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 17, 279–285. (in Chinese with English abstract)
- Xing YX (邢廷铤) (1999). The model of plantation of combining agriculture and animal husbandry and its development strategy. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 20(1), 46–49. (in Chinese with English abstract)
- Yang HB, Chen M, Wang BS (2002). Study on Na<sup>+</sup> exclusion mechanism of the Na<sup>+</sup> exclusion parts in wheat seedlings. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 28, 181–186.
- Yang YS (杨运生), Hong RS (洪汝生), Li R (李荣), Xu BQ (徐宝琪) (1984). The study on the characteristics of *Pennisetum* and its hybrid species introduced. *Jiangsu Agriculture Science* (江苏农业科学), (2), 35–37. (in Chinese with English abstract)
- Yang YS (杨运生), Li R (李荣), Xu BQ (徐宝琪), Hong RX (洪汝兴), Gu HR (顾洪如) (1987). Studies on the vegetative multiplication of hybrid *Pennisetum*. *Pratacultural Science of China* (中国草业科学), (2), 14–18. (in Chinese with English abstract)

特邀编委: 李志安 责任编辑: 李敏